International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)
Peer-Reviewed Journal
ISSN: 2349-6495(P) | 2456-1908(O)
Vol-12, Issue-3; Mar, 2025
Journal Home Page Available: [*https://ijaers.com/*](https://ijaers.com/)
Article DOI: [*https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.123.4*](https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.123.4)

Applications of Design of Experiments (DOES) in Engineering – State of the Art

Aplicações de Planejamentos de Experimentos (DOES) na Engenharia – Estado da Arte

Leandro Santos Ribeiro[1], Paulo César de Resende Andrade[2]

[1]Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Brasil
leandro.ribeiro@ufvjm.edu.br
[2]Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Brasil
paulo.andrade@ict.ufvjm.edu.br

Received: 03 Feb 2025,

Receive in revised form: 05 Mar 2025,

Accepted: 15 Mar 2025,

Available online: 22 Mar 2025

***Keywords*— DOE, Engineering, Process Optimization, Design of Experiments, Taguchi**

***Palavras chave*— DOE, Engenharia, Otimização de Processos, Planejamento de Experimentos, Taguchi**

***Abstract*—** *Design of Experiments (DOE) is an essential statistical methodology for engineering, allowing the systematic analysis of processes and the optimization of products. Its use allows the controlled manipulation of variables to maximize efficiency and quality in several areas, such as chemical, mechanical and materials engineering. However, despite its effectiveness, there are still challenges in the practical implementation of DOE, especially due to the methodological complexity and the lack of training in some industries. The study includes a review of practical cases between 2009 and 2024, selected from the academic database ScienceDirect, which illustrate the applications of DOE in industrial and scientific contexts, with emphasis on the factorial and Taguchi methods. Through DOE, it is possible to identify the most influential variables in a process and determine the ideal conditions to maximize system performance. Methodologies such as the Taguchi method, analysis of variance (ANOVA) and response surfaces allow engineers to explore the simultaneous impact of multiple factors, enabling a robust approach to decision-making in a controlled and efficient manner, with significantly lower costs and efforts. The research results demonstrate applications of DOE in areas such as optimization of machining processes in mechanical engineering, improvement of the thermal efficiency of heat exchangers in chemical engineering, and the development of high-strength metal alloys in materials engineering. In addition, there was an increase in the adoption of DOE in emerging sectors, such as genetic engineering and optimization of advanced materials. It is concluded that DOE is an indispensable tool for innovation and industrial competitiveness, promoting greater efficiency and reliability in processes. However, there is still room for its evolution, mainly in the development of more accessible approaches and in professional training for its effective implementation. This study contributes to the dissemination of knowledge about DOE, encouraging*

its wider adoption in engineering and driving technological advances in the most diverse areas.

Resumo— *O Planejamento de Experimentos (DOE) é uma metodologia estatística essencial para a engenharia, permitindo a análise sistemática de processos e a otimização de produtos. Seu uso possibilita a manipulação controlada de variáveis para maximizar eficiência e qualidade em diversas áreas, como engenharia química, mecânica e de materiais. No entanto, apesar de sua eficácia, ainda há desafios na implementação prática do DOE, especialmente devido à complexidade metodológica e à falta de capacitação em algumas indústrias. O estudo inclui uma revisão de casos práticos entre 2009 e 2024, selecionados da base de dados acadêmica ScienceDirect, que ilustram as aplicações do DOE em contextos industriais e científicos, com ênfase nos métodos fatorial e Taguchi. Por meio do DOE, é possível identificar as variáveis mais influentes em um processo e determinar as condições ideais para maximizar o desempenho do sistema. Metodologias como o método Taguchi, análise de variância (ANOVA) e superfícies de resposta permitem que os engenheiros explorem o impacto simultâneo de múltiplos fatores possibilitando uma abordagem robusta para a tomada de decisões de maneira controlada e eficiente, com custos e esforços significativamente menores. Os resultados da pesquisa demonstram aplicações do DOE em áreas como otimização de processos de usinagem na engenharia mecânica, o aprimoramento da eficiência térmica de trocadores de calor na engenharia química e o desenvolvimento de ligas metálicas de alta resistência na engenharia de materiais. Além disso, observou-se um crescimento na adoção do DOE em setores emergentes, como engenharia genética e otimização de materiais avançados. Conclui-se que o DOE é uma ferramenta indispensável para a inovação e a competitividade industrial, promovendo maior eficiência e confiabilidade nos processos. No entanto, ainda há espaço para sua evolução, principalmente no desenvolvimento de abordagens mais acessíveis e na capacitação profissional para sua implementação eficaz. Este estudo contribui para a disseminação do conhecimento sobre DOE, incentivando sua adoção mais ampla na engenharia e impulsionando avanços tecnológicos nas mais diversas áreas.*

I. INTRODUÇÃO

O Planejamento de Experimentos (*Design of Experiments* – DOE) é uma metodologia estatística utilizada para o planejamento, execução e análise de experimentos, sendo amplamente empregada no teste e otimização de processos, sistemas e produtos em diversas áreas da engenharia. Sua aplicação permite estimar o impacto de múltiplos fatores simultaneamente, possibilitando a identificação das relações entre variáveis independentes e dependentes em sistemas complexos (Durakovic, 2017). O princípio fundamental do DOE reside na organização sistemática dos experimentos, visando maximizar a obtenção de informações com o menor custo e esforço experimental. Para isso, empregam-se métodos estatísticos rigorosos, como a análise de variância (ANOVA) e a regressão linear, garantindo a robustez e a confiabilidade dos resultados (Smucker et al., 2023).

Historicamente, os métodos experimentais eram limitados e, frequentemente, utilizavam a abordagem *One Factor At a Time* (OFAT), na qual apenas um fator era alterado por vez, enquanto os demais permaneciam constantes. Apesar de sua simplicidade, essa técnica apresentava limitações significativas, como a impossibilidade de identificar interações entre variáveis e a necessidade de um grande número de experimentos para obter conclusões robustas. A evolução do planejamento experimental ocorreu na década de 1920, com as contribuições de R. A. Fisher, que, ao atuar na Estação Experimental Rothamsted, na Inglaterra, desenvolveu os fundamentos do planejamento experimental moderno

(Fisher, 1925). Fisher introduziu conceitos essenciais, como a aleatorização, a replicação e os experimentos fatoriais, permitindo a análise simultânea de múltiplos fatores com maior precisão e eficiência (Ilzarbe et al., 2008). Essas inovações deram origem a metodologias mais avançadas, como os experimentos fatoriais completos e fracionados, que se tornaram referência na pesquisa científica e industrial, consolidando o DOE como uma ferramenta essencial na engenharia e em outras áreas aplicadas.

Atualmente, o DOE desempenha um papel estratégico na engenharia, especialmente nos setores de manufatura, engenharia química e engenharia de materiais, sendo amplamente utilizado para a otimização de processos e a melhoria da qualidade de produtos e sistemas. O arcabouço teórico estabelecido por Fisher foi posteriormente expandido por pesquisadores como Genichi Taguchi, que desenvolveu abordagens voltadas para o aprimoramento da robustez dos processos industriais (Taguchi, 1986). Os *Taguchi Methods* enfatizam a minimização da variabilidade e a redução da influência de perturbações externas, garantindo maior estabilidade e qualidade dos produtos. Essas técnicas foram rapidamente incorporadas a metodologias de gestão da qualidade, como o *Six Sigma*, devido à sua eficácia na identificação de fatores críticos e na otimização de processos, resultando na redução de custos e no aumento da confiabilidade dos sistemas (Durakovic, 2017; Milosavljević et al., 2024).

Com os avanços tecnológicos, ferramentas computacionais passaram a ampliar as aplicações do DOE, facilitando o planejamento e a análise de experimentos complexos. Softwares estatísticos, como R e Minitab, oferecem recursos avançados para modelagem experimental, tornando o DOE mais acessível a pesquisadores e profissionais (Tanaka & Amaliah, 2022). Essa evolução contribuiu para a popularização da metodologia, viabilizando sua aplicação em diferentes contextos, incluindo setores emergentes e pesquisas de menor escala.

Assim, o planejamento experimental possibilita a identificação de variáveis-chave e a definição de condições operacionais ideais para a otimização de sistemas (Box et al., 2005). O desenvolvimento contínuo do DOE tem expandido suas aplicações para novos domínios, consolidando-o como uma ferramenta indispensável na engenharia moderna.

Apesar da ampla aceitação do DOE, desafios persistem, como a capacitação de profissionais sem formação estatística e a adaptação à crescente complexidade dos sistemas. A integração de inteligência artificial e algoritmos avançados oferece novas oportunidades para melhorar a análise experimental, mas exige investimentos em treinamento e ferramentas especializadas (Khan et al., 2023).

Além disso, torna-se essencial avaliar a aplicabilidade do DOE em contextos que demandam soluções sustentáveis e otimizadas, como a transição para indústrias de baixo carbono e o desenvolvimento de tecnologias limpas. Essas lacunas na literatura indicam a necessidade de estudos que investiguem a evolução do DOE nas últimas décadas e suas tendências futuras (Durakovic, 2017).

Diante desse cenário, este estudo busca preencher essa lacuna ao apresentar uma revisão sistemática das aplicações do DOE na engenharia entre 2009 e 2024. O objetivo é identificar padrões e inovações no uso dessa metodologia, destacando suas contribuições para a otimização de processos industriais e o avanço tecnológico. Espera-se, assim, fornecer aos engenheiros e pesquisadores um referencial consolidado que favoreça a aplicação eficiente do DOE em diferentes contextos industriais e acadêmicos. Além disso, pretende-se aprofundar a compreensão das interconexões entre os avanços teóricos e as aplicações práticas do DOE, contribuindo para a formulação de diretrizes que orientem futuras pesquisas e implementações.

II. METODOLOGIA

Objetivo De Estudo

Este estudo busca compilar e analisar casos práticos publicados em periódicos técnicos entre 2009 e 2024, demonstrando a aplicação do Planejamento de Experimentos (DOE) em diversas áreas da engenharia. Esse intervalo foi selecionado devido ao aumento significativo no número de publicações relacionadas ao tema a partir de 2009, além da existência de revisões bibliográficas abrangentes até 2008.

Os estudos selecionados abrangem uma ampla variedade de periódicos científicos e oferecem uma fonte valiosa para acadêmicos, consultores e profissionais interessados em identificar aplicações específicas do DOE em suas áreas de atuação. Além disso, essa compilação representa um recurso prático que facilita a transferência de conhecimento para futuras aplicações industriais.

Para a seleção dos casos práticos, foram utilizadas as bases de dados Web of Science e ScienceDirect, resultando na identificação de trinta estudos relevantes dentro do período analisado. Esses casos foram organizados e classificados conforme seu campo de aplicação, permitindo uma análise descritiva que contempla os objetivos dos estudos, os modelos de planejamento experimental adotados, os setores de aplicação e a evolução das práticas ao longo do tempo.

Origem Do Banco De Dados

O processo de seleção dos casos práticos seguiu as etapas descritas a seguir:

1. **Busca inicial**: Foi realizada uma pesquisa na base de dados ScienceDirect utilizando o termo "Design of Experiments", abrangendo o período de 2009 a 2024. Essa consulta resultou em um total de 126.165 artigos, incluindo tanto estudos teóricos quanto aplicações práticas do DOE.
2. **Filtragem por área**: Para restringir a busca ao campo da engenharia, aplicaram-se filtros específicos, reduzindo o conjunto de artigos para 45.535 publicações.
3. **Triagem manual**: Foi realizada uma análise dos resumos de uma amostra representativa desses artigos. O critério de seleção considerou exclusivamente estudos que apresentavam casos de aplicação prática do DOE em contextos reais da engenharia, focados na otimização de processos e na solução de problemas industriais.
4. **Construção do banco de dados**: Após essa triagem criteriosa, foi constituído um banco de dados contendo trinta artigos que atendiam aos objetivos do estudo.

III. ANÁLISE DE APLICAÇÕES PRÁTICAS

Evolução Das Publicações Ao Longo Do Tempo

A aplicação do Design de Experimentos (DOE) tem se expandido significativamente nas últimas décadas, consolidando-se como uma metodologia essencial para a melhoria e otimização de processos em diversos setores industriais. Segundo Montgomery (2017), o DOE permite uma análise robusta das variáveis que influenciam um processo, proporcionando um entendimento detalhado das interações e facilitando a tomada de decisões para melhorias contínuas.

Na Figura 1 está apresentada a evolução do número de publicações sobre DOE nos últimos 10 anos, evidenciando uma tendência crescente de interesse e adoção dessa metodologia. Esse aumento reflete o reconhecimento do DOE como uma ferramenta fundamental para a otimização e inovação em diversas áreas da engenharia. O crescimento das publicações também indica o aprimoramento contínuo das técnicas associadas ao DOE, tornando-o cada vez mais indispensável para pesquisas e avanços tecnológicos.
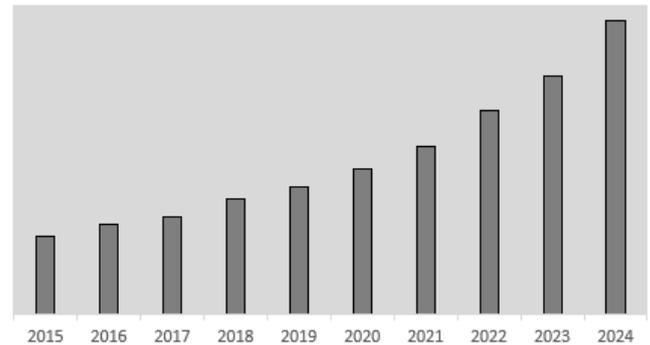
Fig.1: Evolução das publicações sobre DOE ao longo do tempo.

Fonte: Feito pelo autor

Area De Aplicação

O DOE é amplamente valorizado em setores que exigem alto rigor técnico, como engenharia química e engenharia mecânica. Na engenharia química, por exemplo, o DOE é frequentemente utilizado para otimizar processos de síntese e reações químicas, representando 33,33% das aplicações analisadas (Bisgaard, 2016).

Na engenharia mecânica, que corresponde a 30% dos casos estudados, o DOE auxilia na determinação de parâmetros operacionais ideais e na redução da variabilidade dos processos, sendo essencial para a fabricação e o controle de qualidade (Taguchi, 1986).

Outras áreas também fazem uso significativo do DOE:

- **Engenharia de Materiais (10%)**: emprega o DOE para estudar propriedades de novos materiais e suas respostas sob diferentes condições experimentais.
- **Engenharia Genética e Bioquímica (10%)**: utiliza o DOE para otimizar processos de bioprocessamento e experimentos em genética aplicada (Gunst & Mason, 2009).

Esses dados reforçam o DOE como um instrumento essencial para inovação, eficiência e competitividade industrial. Na Figura 2 ilustra-se a distribuição das aplicações do DOE em diferentes áreas da engenharia.
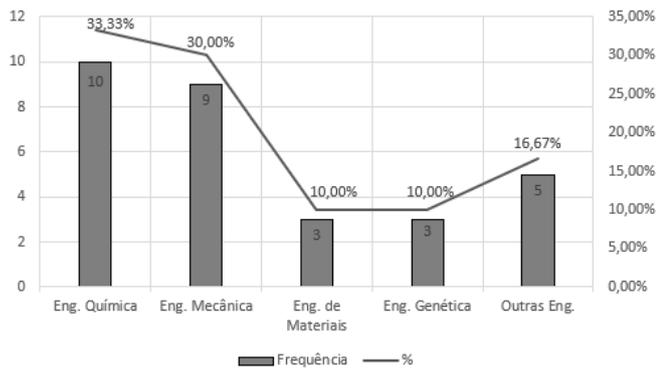
Fig.2: Distribuição das aplicações do DOE por área da engenharia.

Fonte: Feito pelo autor

Tipo De Design Utilizado

Os métodos mais empregados no Design de Experimentos (DOE) incluem o planejamento fatorial e a metodologia de Taguchi, ambos amplamente utilizados devido à sua eficácia em contextos industriais diversos.

De acordo com Myers et al. (2009), o planejamento fatorial é amplamente utilizado para analisar múltiplas variáveis e suas interações, sendo ideal para otimizações complexas que exigem uma visão abrangente dos efeitos combinados dos fatores. Essa abordagem permite uma análise sistemática dos experimentos, contribuindo significativamente para a melhoria contínua dos processos.

Por outro lado, a metodologia de Taguchi é amplamente reconhecida por sua abordagem robusta de controle de qualidade. Taguchi (1986) introduziu o conceito de matrizes ortogonais, permitindo a otimização de múltiplos fatores com um número reduzido de experimentos, tornando o método altamente eficiente. Essa abordagem é particularmente útil em ambientes industriais onde a redução da variabilidade é essencial para garantir produtos mais confiáveis e processos mais estáveis (Roy, 2001).

A escolha entre esses métodos reflete a busca por estratégias que maximizem a qualidade e otimizem os recursos disponíveis. Ambos desempenham um papel fundamental no aprimoramento da eficiência operacional e na inovação tecnológica, consolidando o DOE como uma metodologia indispensável na engenharia e manufatura.

IV. APLICAÇÕES PRÁTICAS

As aplicações práticas do Planejamento de Experimentos (DOE) abrangem diversas áreas da engenharia, sendo uma ferramenta essencial para otimização de processos, melhoria da qualidade de produtos e redução de custos. A seguir, estão listadas algumas dessas aplicações conforme suas respectivas áreas.

Engenharia Química

O uso do Planejamento de Experimentos (DOE) na Engenharia Química tem se consolidado como uma ferramenta essencial para a otimização de processos, melhoria da qualidade de produtos e redução de custos operacionais. Sua aplicação abrange áreas como bioprocessos, produção de energia e síntese de novos materiais. A versatilidade do DOE, com sua capacidade de identificar interações entre variáveis e otimizar condições experimentais, tem sido fundamental para diversas inovações tecnológicas e científicas neste campo. metodologia de Taguchi, ambos amplamente utilizados devido à sua eficácia em contextos industriais diversos.

Um exemplo relevante é a aplicação do DOE na ampliação de processos cromatográficos. Shekhawat et al. (2018) utilizaram o DOE para otimizar processos cromatográficos em bioprocessos. O uso do Split Design permitiu ajustar as condições experimentais e aprimorar a compreensão das interações entre os parâmetros do processo, contribuindo para o aumento da eficiência na separação de componentes em sistemas biotecnológicos. Essa abordagem não só minimizou o número de experimentos necessários, mas também garantiu o controle de uma variável crítica, resultando em um processo mais eficaz e economicamente viável.

De maneira semelhante, Biondo et al. (2024) aplicaram o DOE para otimizar a produção de hidrogênio a partir da decomposição de metano, com foco na redução de emissões de COx. Através do DOE, os pesquisadores conseguiram identificar os parâmetros mais influentes na eficiência do processo, permitindo uma produção mais sustentável e com menor impacto ambiental. Esta aplicação ilustra claramente como o DOE pode ser utilizado para resolver questões tecnológicas e ambientais de grande relevância, como a transição para fontes de energia mais limpas.

O DOE também tem sido amplamente utilizado na engenharia de processos térmicos e de admissão. Korkerd et al. (2024) integraram o DOE com simulações CFD-DEM para analisar a transmissão de calor e a admissão de biomassa e sílica em leitos fluidizados. A combinação das simulações computacionais com o DOE permitiu uma análise detalhada das diferentes configurações de tubos imersos, proporcionando insights cruciais para otimizar a eficiência dos sistemas de troca térmica e os processos de material.

Na área de síntese química, o DOE tem demonstrado grande relevância. Hernández-Rivera et al. (2023) utilizaram o DOE para otimizar a síntese do epóxido de diosgenina, com o objetivo de melhorar o rendimento diastereoseletivo e as propriedades antimicrobianas,

antioxidantes e antiproliferativas do composto. A aplicação do DOE não apenas ajudou a determinar as melhores condições para a síntese, mas também contribuiu para a descoberta de novos compostos com propriedades farmacológicas promissoras, ampliando as possibilidades de desenvolvimento de tratamentos inovadores.

Outras áreas, como o desenvolvimento de curcumina encapsulada em nanopartículas de sílica, também se beneficiam amplamente do DOE. Saputra et al. (2022) aplicaram o método Taguchi para otimizar o processo de agregação de curcumina em nanopartículas, melhorando a estabilidade do composto. O uso do DOE permitiu definir as condições experimentais ideais para maximizar a eficácia do processo, com implicações para a ampliação de sistemas de liberação controlada, com aplicações tanto na indústria farmacêutica quanto alimentícia.

Além disso, o DOE é amplamente utilizado em processos de análise e instrumentação. Lanot et al. (2023) empregaram o DOE para otimizar a padronização interna no ICP-MS, uma técnica analítica essencial para a quantificação de elementos-traço. A utilização do DOE neste contexto contribuiu para a melhoria da precisão e confiabilidade dos resultados analíticos, uma consideração crucial em análises químicas de alta precisão.

Pesquisas adicionais, como a de Nagy et al. (2024), que otimizaram a síntese de N,N,N-trimetilquitossano, demonstram a aplicabilidade do DOE no desenvolvimento de novos materiais com propriedades específicas. A revisão de Ranc et al. (2016) sobre a seleção de doses de oxidantes para a oxidação química in situ de solos contaminados por hidrocarbonetos aromáticos policíclicos destaca ainda a versatilidade do DOE em processos ambientais.

Engenharia Mecânica

Estudos recentes demonstram a versatilidade e a eficácia do DOE na engenharia mecânica, especialmente na otimização de componentes e processos. Ghalandari et al. (2019) utilizaram uma abordagem híbrida que combina aprendizado de máquina com o DOE para otimizar as lâminas do compressor da primeira fila em um test stand aeromecânico. A integração de algoritmos genéticos, redes neurais artificiais e DOE possibilitou uma análise detalhada dos parâmetros envolvidos, resultando em melhorias significativas no desempenho aerodinâmico e mecânico das lâminas. Esse estudo destaca o potencial do DOE em processos de otimização complexos que envolvem múltiplos fatores interdependentes.

Outro exemplo relevante é o estudo de Senthilkumar et al. (2014), que investigou o desempenho de insertos de carboneto cementado de diferentes geometrias, utilizando o DOE com base na análise de relações cinzas (grey relational analysis) e no método Taguchi. A pesquisa demonstrou como o DOE pode ser aplicado para identificar e otimizar variáveis que afetam o desempenho de ferramentas de corte, como geometria, velocidade de corte e outros parâmetros de processo. Isso resulta em uma produção mais eficiente e uma maior vida útil das ferramentas, facilitando a escolha das melhores condições operacionais e, consequentemente, reduzindo os custos de operação e melhorando a qualidade do processo de usinagem.

A impressão 3D também se beneficia da aplicação do DOE, como evidenciado pelos estudos de Zaman et al. (2019) e Alafaghani e Qattawi (2018). Ambos os estudos utilizaram o método Taguchi para investigar os parâmetros do processo de modelagem por deposição fundida (FDM), como temperatura de extrusão e velocidade de impressão, com o objetivo de otimizar a resistência e a precisão das peças produzidas. Esses trabalhos demonstram como o DOE pode ser empregado para melhorar a qualidade dos produtos fabricados aditivamente, um campo em rápido crescimento na engenharia mecânica. A aplicação do DOE permitiu identificar os parâmetros críticos que afetam as propriedades mecânicas das peças impressas e contribuiu para a melhoria dos processos de fabricação aditiva, minimizando falhas e defeitos no produto final.

No campo da otimização de compósitos e materiais avançados, o trabalho de Sidharthan et al. (2023) utilizou o método Taguchi para analisar e otimizar as propriedades mecânicas e tribológicas de compósitos híbridos de alumínio funcionalmente graduados, reforçados com SiC e MoS2. A pesquisa demonstrou como o DOE pode ser aplicado para otimizar as propriedades materiais e o desempenho tribológico em processos de fabricação, contribuindo para o desenvolvimento de novos materiais com características superiores para aplicações mecânicas exigentes.

Além disso, a pesquisa de Ma e Qu (2015) exemplifica o uso do DOE na otimização de motores de relutância comutados, utilizando o método de otimização por enxame de partículas (particle swarm optimization) em conjunto com o DOE. A combinação dessas duas abordagens permitiu uma análise detalhada dos parâmetros de design, resultando em melhorias no desempenho e na redução de custos de produção de motores elétricos, componentes essenciais em sistemas mecânicos de controle de energia. A integração dessas metodologias possibilitou otimizações multiobjetivo, essenciais em projetos de alta performance.

Esses exemplos destacam a importância do DOE como uma ferramenta poderosa na engenharia mecânica, especialmente em contextos de alta complexidade e múltiplas variáveis. O DOE oferece uma abordagem científica rigorosa e eficiente para a análise e otimização de processos, garantindo resultados precisos e o

desenvolvimento de soluções inovadoras. Além disso, a integração do DOE com outras técnicas de otimização, como algoritmos evolutivos e análise de dados, tem ampliado as fronteiras da engenharia mecânica, permitindo o avanço para novos paradigmas de fabricação e design.

Engenharia De Materiais

No setor de agregados para a construção, o trabalho de Bhadani et al. (2024) ilustra como o Design de Experimentos (DoE) foi empregado para avaliar e otimizar o desempenho dos processos de britagem e peneiramento de agregados. Esses processos são fundamentais na produção de materiais para a construção civil, e a aplicação do DoE permitiu identificar combinações ideais de parâmetros operacionais, maximizando a eficiência do processo, reduzindo perdas e melhorando a qualidade dos agregados. Por meio do planejamento experimental, foi possível isolar os efeitos das variáveis-chave, possibilitando uma compreensão mais aprofundada de como as mudanças em um fator poderiam influenciar os resultados, como a distribuição de tamanhos de partículas e a eficiência do processo de separação. Essa abordagem não só resultou em ganhos de desempenho operacional, mas também contribuiu para a sustentabilidade da indústria, ao reduzir desperdícios e melhorar o uso de recursos.

Outro exemplo significativo do uso do DoE na engenharia de materiais é o estudo de Román-Ramírez e Marco (2022), que revisa a aplicação dessa metodologia no desenvolvimento de baterias de lítio-íon, um componente crítico para a indústria de energia e mobilidade elétrica. O desenvolvimento de baterias mais eficientes e duráveis exige a investigação de várias variáveis, como a composição química dos materiais, a estrutura das células e os parâmetros de fabricação. O uso do DoE neste contexto possibilitou a otimização do design das baterias, permitindo aos pesquisadores explorar diferentes configurações de materiais e processos, como a composição dos eletrodos e o tratamento térmico das células, para obter o melhor desempenho em termos de capacidade de carga, tempo de vida útil e segurança. Além disso, a aplicação do DoE tem permitido não só aprimorar as propriedades das baterias, mas também reduzir custos de produção e melhorar a sustentabilidade do processo, fatores essenciais para a viabilidade comercial em larga escala dessas tecnologias.

No campo dos elastômeros e compostos poliméricos, a pesquisa de Nunez Carrero et al. (2022) exemplifica como o DOE pode ser aplicado no desenvolvimento de compostos de borracha auto-regenerativa, utilizando aditivos reforçadores derivados de pneus reciclados. A aplicação do DOE nesse estudo foi crucial para definir as proporções ideais entre os materiais, como borracha estireno-butadieno e pó de pneus reciclados, de modo a otimizar tanto as propriedades mecânicas quanto as de auto-cura do composto. Com a análise experimental, foi possível determinar quais variáveis mais influenciavam as características do material, como resistência à tração, elasticidade e capacidade de regeneração após danos. O uso do DoE permitiu, assim, o desenvolvimento de compostos mais eficientes e com menor impacto ambiental, ao mesmo tempo em que atendiam às exigências de desempenho para aplicações nas indústrias automotiva e de construção.

Esses exemplos demonstram a ampla gama de aplicações do DoE na engenharia de materiais, destacando sua importância na melhoria de processos e no desenvolvimento de novos produtos. Ao permitir uma análise precisa das interações entre diferentes variáveis, o DoE oferece um meio eficaz de otimizar tanto a qualidade quanto o desempenho dos materiais, além de contribuir para a inovação tecnológica e a sustentabilidade. Com seu caráter sistemático e rigoroso, a aplicação do DoE tem se consolidado como uma ferramenta indispensável na busca por soluções cada vez mais eficientes e avançadas na engenharia de materiais.

Engenharia Genética

Um exemplo notável da aplicação do Design de Experimentos (DOE) na engenharia genética é o estudo de Moazami Goodarzi et al. (2024), que utilizou o DOE para otimizar o processo de purificação do antígeno de superfície da hepatite B recombinante a partir de *Pichia pastoris*. A pesquisa envolveu a análise de diferentes condições de purificação utilizando a resina Capto adhere, com o objetivo de maximizar a eficiência e a pureza do produto final. Por meio de um planejamento experimental rigoroso, os pesquisadores conseguiram identificar as condições ideais para o processo de purificação, resultando em uma melhoria significativa na recuperação do antígeno e na redução de custos operacionais. Esse exemplo ilustra como o DOE pode ser uma ferramenta poderosa para otimizar processos biotecnológicos, diminuindo o número de experimentos necessários e aumentando a precisão dos resultados.

Outro exemplo relevante é o estudo de Hernández et al. (2023), que aplicaram o DOE para otimizar o ensaio imunológico ELISA quantitativo. A pesquisa utilizou um design fatorial completo para ajustar as variáveis envolvidas na reação imunológica, com o objetivo de melhorar a sensibilidade e a precisão do teste. O uso do DOE permitiu que os pesquisadores identificassem de forma eficiente os fatores que mais influenciavam o desempenho do ensaio, como as concentrações dos reagentes e as condições de incubação. A otimização do processo resultou em um protocolo de ELISA mais eficiente, que pode ser amplamente utilizado na quantificação de biomarcadores em pesquisas biomédicas e diagnósticas. Este estudo

ressalta o papel crucial do DOE em áreas da Engenharia Genética que envolvem testes diagnósticos e ensaios laboratoriais, onde a precisão e a repetibilidade são essenciais.

Ademais, Moon et al. (2024) exploraram a aplicação do DOE para otimizar vias metabólicas em organismos geneticamente modificados. Utilizando engenharia metabólica, os pesquisadores aplicaram o DOE para identificar os parâmetros chave que influenciam a produção de compostos desejados em microrganismos modificados. Através de experimentos planejados, foi possível guiar a otimização genética desses organismos para aumentar a produção de metabólitos de interesse industrial, como ácidos orgânicos e biocombustíveis. O DOE desempenhou um papel essencial na identificação das interações entre os fatores que afetam a expressão genética e a produção metabólica, oferecendo uma base sólida para o desenvolvimento de cepas microbianas mais eficientes.

Outras

O uso de Planejamentos de Experimentos (DOE) na engenharia tem se expandido consideravelmente nas últimas décadas, abrangendo uma gama crescente de áreas e tecnologias. Atualmente, métodos como o Taguchi, a metodologia de superfícies de resposta e experimentos fatoriais têm sido fundamentais para a otimização e o ajuste fino de sistemas complexos. Um exemplo marcante dessa aplicação é o estudo de Kapsalis et al. (2021), que utilizou a técnica Taguchi para otimizar um tipo de aeronave não tripulada (UAV) com a arquitetura Blended-Wing-Body (BWB). Neste trabalho, as simulações numéricas de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) permitiram uma análise simultânea e eficiente de múltiplos fatores aerodinâmicos, como o formato da asa e o desempenho do motor. A metodologia DOE, combinada com o Taguchi, não só possibilitou a otimização de parâmetros-chave, mas também reduziu os custos experimentais e a necessidade de experimentos físicos, diminuindo o tempo de simulação.

Outro exemplo interessante é o estudo de Lujan-Moreno et al. (2018), que integrou o DOE com a metodologia de superfícies de resposta para otimizar os hiperparâmetros de um modelo de aprendizado de máquina baseado em floresta aleatória. A pesquisa demonstrou como o DOE pode ser aplicado em áreas não tradicionais, como o aprendizado de máquina, facilitando a otimização eficiente dos parâmetros do modelo. Essa abordagem é crucial para melhorar a precisão e a eficiência de algoritmos em grandes volumes de dados, contribuindo para o desempenho superior em tarefas complexas, como a previsão de comportamentos em sistemas dinâmicos.

O uso do DOE também tem se mostrado promissor no campo da educação e do aprendizado prático, como evidenciado por Unzueta e Eguren (2023). Os pesquisadores implementaram o aprendizado baseado em projetos (PBL) para o ensino de técnicas de design de experimentos, utilizando a impressão 3D como ferramenta didática. Essa abordagem inovadora permite que os alunos construam protótipos físicos enquanto desenvolvem a capacidade de analisar dados e otimizar processos, integrando teoria e prática de maneira eficaz. Além de facilitar a aprendizagem de conceitos complexos de engenharia, essa metodologia prepara os estudantes para enfrentar desafios do mundo real com uma abordagem analítica e prática.

Na engenharia civil, o DOE tem demonstrado sua eficácia, como exemplificado por Mohan e Mini (2018), que investigaram a resistência e a durabilidade de concreto autoadensável (SCC) com a incorporação de sílica ativa e escória de alto forno ultrafina. O uso do DOE, neste caso, possibilitou uma análise detalhada dos efeitos de diferentes aditivos no desempenho do concreto, permitindo a otimização de suas propriedades sem a necessidade de um grande número de ensaios. Essa aplicação contribuiu significativamente para o desenvolvimento de materiais mais eficientes e duráveis, com implicações diretas para a sustentabilidade na construção civil.

V. CONCLUSÃO

Esta pesquisa demonstrou que o Design of Experiments (DOE) é uma ferramenta essencial para a engenharia moderna, destacando-se por sua versatilidade e capacidade de promover avanços significativos na otimização de processos, redução de custos e aprimoramento da qualidade de produtos e serviços. Com sua aplicação interdisciplinar, o DOE tem se mostrado crucial para engenheiros que enfrentam desafios complexos em áreas como engenharia química, mecânica, de materiais e bioquímica. Essa flexibilidade permite que o DOE seja ajustado para atender às especificidades de cada setor, otimizando recursos e promovendo a eficiência em ambientes cada vez mais competitivos e tecnológicos.

Além de facilitar a inovação, o DOE oferece uma estrutura metodológica rigorosa para a experimentação, permitindo que os profissionais obtenham insights valiosos de maneira mais eficiente e controlada. Em um cenário de rápidas mudanças tecnológicas e crescente demanda por processos sustentáveis e precisos, o DOE se consolida como um método indispensável para a engenharia orientada à melhoria contínua. Ao possibilitar o controle detalhado sobre variáveis e suas interações, o DOE não apenas contribui para o avanço da engenharia, mas também serve como um pilar para práticas inovadoras, promovendo

soluções robustas e eficazes para os desafios da indústria atual e futura.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos que me apoiaram ao longo deste trabalho. Agradeço especialmente ao meu orientador pela valiosa orientação e paciência. Sou profundamente grato pelos feedbacks construtivos e pelo incentivo, que foram fundamentais para o desenvolvimento deste projeto.

Agradeço também aos colegas do Núcleo de Estudos e Pesquisas em Estatística Aplicada (NEPEA) e do Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT) da UFVJM pela colaboração e pelas discussões enriquecedoras. O apoio de vocês foi crucial para a construção deste trabalho.

Além disso, sou grato à minha família e amigos pelo apoio constante e compreensão durante todo o processo de pesquisa. O incentivo de todos me proporcionou forças para superar desafios e seguir em frente com meus objetivos.

Por fim, expresso meu agradecimento à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro por meio da bolsa, que possibilitou a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

[1] Durakovic, B**. Design of experiments application, concepts, examples: State of the art.** Periodicals of Engineering and Natural Sciences, v. 5, p. 421-439, 2017.

[2] Smucker, B.; Stevens, N.; Asscher, J.; Goos, P. **Profiles in the teaching of experimental design and analysis**. Journal of Statistics and Data Science Education, v. 31, p. 1-26, 2023.

[3] Fisher, R. A. **Statistical Methods for Research Workers.** Edinburgh: Oliver & Boyd, 1925.

[4] Ilzarbe, L.; Alvarez, M. J.; Viles, E.; Tanco, M**. Practical applications of design of experiments in the field of engineering: A bibliographical review**. Quality and Reliability Engineering International, v. 24, p. 417-428, 2008.

[5] Taguchi, Genichi. **Introduction to Quality Engineering: Designing Quality into Products and Processes**. Tokyo: Asian Productivity Organization, 1986.

[6] Milosavljević, A.; Pavlov-Kagadejev, M.; Stolić, P. **The importance of design of experiments**. Mining and Metallurgy Engineering Bor, p. 1-6, 2024.

[7] Tanaka, E.; Amaliah, D. **Current state and prospects of R-packages for the design of experiments.** 2022.

[8] Montgomery, Douglas C. **Design and Analysis of Experiments**. 9. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017.

[9] Bisgaard, Søren. **The Use of Experimental Design in Industrial Process Optimization**. Quality Engineering, v. 28, n. 3, p. 321-332, 2016.

[10] Gunst, Richard F.; Mason, Robert L. **Fractional factorial design and its application in the study of biological processes**. Statistical Science, v. 24, n. 3, p. 343-357, 2009.

[11] Myers, Raymond H.; Montgomery, Douglas C.; ANDERSON-COOK, Christine M. **Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments**. 3. ed. New York: Wiley, 2009.

[12] Roy, Ranjit K. **A Primer on the Taguchi Method**. 2. ed. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 2001.

[13] Shekhawat, L.; Godara, A.; Kumar, V.; Rathore, A. **Design of experiments applications in bioprocessing: chromatography process development using split design of experiments**. *Biotechnology Progress*, v. 35, 2018.

[14] Biondo, L. D.; Manera, C.; Aguzzoli, C.; Godinho, M. **DoE-driven thermodynamic assessment of COX-free hydrogen production from methane decomposition.** *Catalysis Communications*, v. 187, 106874, 2024.

[15] Korkerd, K.; Zhou, Z.; Zou, R.; Piumsomboon, P.; Chalermsinsuwan, B. **Effect of immersed tubes configurations on mixing and heat transfer of mixed biomass and silica sand in a bubbling fluidized bed using CFD-DEM and statistical experimental design analysis**. Powder Technology, v. 437, 119542, 2024.

[16] Hernández-Rivera, J. A.; Herrera-García, M.; López-Castillo, G. N.; Sandoval-Ramírez, J.; Carrasco-Carballo, A. **Epoxide of diosgenin acetate synthesis: DoE for diastereoselective yield optimization, antimicrobial, antioxidant and antiproliferative effects**. *Steroids*, v. 197, 109256, 2023.

[17] Saputra, O. A.; Wibowo, F. R.; Lestari, W. W. **High storage capacity of curcumin loaded onto hollow mesoporous silica nanoparticles prepared via improved hard-templating method optimized by Taguchi DoE**. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, v. 33, 101070, 2022.

[18] Lanot, T.; Lavit, M.; Gandia, P.; El Balkhi, S. **Optimization of ICP-MS internal standardization for 26 elements by factorial design experiment.** Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, v. 78, 127178, 2023.

[19] Nagy, V.; Snorradóttir, B. S.; Lauzon, H. L.; Másson, M. **Optimizing N,N,N-trimethyl chitosan synthesis: A design of experiments (DoE) approach.** *Carbohydrate Polymers*, v. 335, 122065, 2024.

[20] Ranc, B.; Faure, P.; Croze, V.; Simonnot, M. O. **Selection of oxidant doses for in situ chemical oxidation of soils contaminated by polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): A review**. Journal of Hazardous Materials, v. 312, p. 280-297, 2016.

[21] Ghalandari, M; Ziamolki, A; Mosavi, A; Shamshirband, S; Chau, KW; Bornassi, S. **Aeromechanical optimization of first row compressor test stand blades using a hybrid machine learning model of genetic algorithm, artificial neural networks and design of experiments**. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, v. 13, n. 1, p. 892-904, 2019.

[22] Senthilkumar, N.; Tamizharasan, T.; Anandakrishnan, V. **Experimental investigation and performance analysis of**

cemented carbide inserts of different geometries using Taguchi based grey relational analysis. Measurement, v. 58, p. 520-536, 2014.

[23] Zaman, U. K. U.; Boesch, E.; Siadat, A.; Rivette, M.; Baqai, A. **Impact of Fused Deposition Modeling (FDM) process parameters on strength of built parts using Taguchi's Design of Experiments.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 101, p. 1215-1226, 2019.

[24] Alafaghani, A.; Qattawi, A. **Investigating the effect of fused deposition modeling processing parameters using Taguchi design of experiment method.** Journal of Manufacturing Processes, v. 36, p. 164-174, 2018.

[25] Sidharthan, S.; Raajavignesh, G.; Nandeeshwaran, R.; Radhika, N.; Jojith, R.; Jeyaprakash, N. **Mechanical property analysis and tribological response optimization of SiC and MoS2 reinforced hybrid aluminum functionally graded composite through Taguchi's DOE.** Journal of Manufacturing Processes, v. 102, p. 965-984, 2023.

[26] Ma, C.; Qu, L. **Multiobjective optimization of switched reluctance motors based on design of experiments and particle swarm optimization**. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 30, p. 1-10, 2015.

[27] Bhadani, K; Asbjörnsson, G; Hofling, K; Hulthén, E; Evertsson, M**. Application of design of experiments (DoE) in evaluating crushing-screening performance for aggregates production**. Minerals Engineering, v. 209, 108616, 2024.

[28] Román-Ramírez, L. A.; Marco, J. **Design of experiments applied to lithium-ion batteries: a literature review**. *Applied Energy*, v. 320, 119305, 2022.

[29] Nunez Carrero, K. C.; Alonso Pastor, L. E.; Hernández Santana, M; Pastor, J. M. **Design of self-healing styrene-butadiene rubber compounds with ground tire rubber-based reinforcing additives by means of DoE methodology.** *Materials & Design*, v. 221, 11090, 2022.

[30] Moazami Goodarzi, M.; Jalalirad, R.; Doroud, D.; Hozouri, H.; Aghasadeghi, M. R. **DOE-based process optimization for development of efficient methods for purification of recombinant hepatitis B surface antigen from Pichia pastoris feedstock using Capto adhere resin**. Heliyon, v. 10, n. 15, e35124, 2024.

[31] Hernández, C. A.; Pérez-Bernal, M.; Abreu, D.; Valdivia, O.; Delgado, M.; Dorta, D.; Domínguez, A. G.; Pérez, E. R.; Sánchez-Ríos, J. M. **Step-by-step full factorial design to optimize a quantitative sandwich ELISA**. Analytical Biochemistry, v. 674, 115195, 2023.

[32] Moon, S.; Saboe, A.; Smanski, M. J. U**sing design of experiments to guide genetic optimization of engineered metabolic pathway**s. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, v. 51, 2024.

[33] Kapsalis, S.; Panagiotou, P.; Yakinthos, K. **CFD-aided optimization of a tactical Blended-Wing-Body UAV platform using the Taguchi method**. Aerospace Science and Technology, v. 108, 106395, 2021.

[34] Lujan-Moreno, G. A.; Howard, P. R.; Rojas, O. G.; Montgomery, D. C. **Design of experiments and response surface methodology to tune machine learning hyperparameters, with a random forest case-study**. Expert Systems with Applications, v. 109, p. 195-205, 2018.

[35] Unzueta, G.; Eguren, J. **Implementation of project-based learning for design of experiments using 3D printing**. Journal of Industrial Engineering and Management, v. 16, n. 2, p. 263-274, 2023.

[36] Mohan, A.; Mini, K. M. **Strength and durability studies of SCC incorporating silica fume and ultra fine GGBS**. Construction and Building Materials, v. 171, p. 919-928, 2018.